



(10) **DE 10 2021 102 038 B3** 2022.05.19

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 102 038.7**
(22) Anmeldetag: **29.01.2021**
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **19.05.2022**

(51) Int Cl.: **G02B 6/12** (2006.01)
H01S 3/063 (2006.01)
H01S 3/13 (2006.01)
H01S 5/125 (2006.01)
G02B 6/14 (2006.01)
H01S 5/0687 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz- Institut
für Höchstfrequenztechnik, 12489 Berlin, DE**

(72) Erfinder:
**Arar, Bassem, Dr., 12351 Berlin, DE; Wicht,
Andreas, Dr., 12459 Berlin, DE**

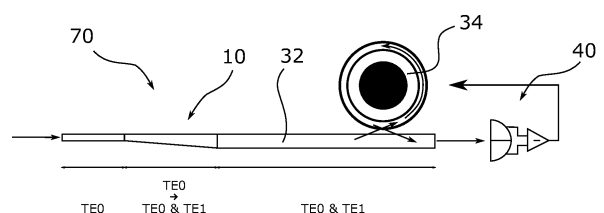
(74) Vertreter:
**Gulde & Partner Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB, 10179 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	2019 / 0 067 904	A1
EP	3 314 320	B1
WO	01/ 03 258	A1

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals, Laser und Sensor**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals, insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals, dass die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur beschreibt. Das Verfahren und die Vorrichtung können zur Frequenzstabilisierung von Lasern, für die Frequenzstabilisierung von resonanten Wellenleiterstrukturen und für Anwendungen in der Sensorik eingesetzt werden. Das Verfahren umfasst die Einkopplung einer kohärenten Überlagerung einer Grundmode und einer ersten antisymmetrischen Obermode einer Referenzstrahlung in eine resonante Wellenleiterstruktur (34), wobei die resonante Wellenleiterstruktur (34) zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung bei einer von der Modendispersion zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode abhängigen Phasenverschiebung ausgebildet ist; die Messung eines Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung mittels einer Detektionseinrichtung (40); und die Ableitung eines Fehlersignals (F) aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis. Eine erfindungsgemäße Vorrichtung ist zur Durchführung des beanspruchten Verfahrens geeignet.



Beschreibung

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals, insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals, dass die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur beschreibt. Das Verfahren und die Vorrichtung können zur Frequenzstabilisierung von Lasern, für die Frequenzstabilisierung von resonanten Wellenleiterstrukturen und für Anwendungen in der Sensorik eingesetzt werden.

Stand der Technik

[0002] Beim Betrieb von transversal grundmodigen (auch als monomodig bzw. singlemodig bezeichneten) DBR (engl. „distributed Bragg reflector“) Lasern muss sichergestellt werden, dass die Resonanzfrequenz des zugehörigen, unmittelbar in die Halbleiterstruktur integrierten Bragg-Reflektors während des Betriebs auf die Frequenz der gewünschten longitudinalen Mode (Emissionswellenlänge) abgestimmt bleibt. Im Stand der Technik wird hierzu typischerweise die Abhängigkeit der resonatorinternen Leistung von der Emissionswellenlänge zur Ableitung eines Fehlersignals für die Abstimmung der Laserfrequenz auf die Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters genutzt. Insbesondere in der Nähe dieser Resonatorresonanz ist diese Abhängigkeit aber jedoch gering und eine Anwendung solcher Methoden daher schwierig. Zur spektralen Filterung können außer einem DBR jedoch auch andere spektrale Filterelemente innerhalb und außerhalb der Laserkavität verwendet werden. Der Bragg-Reflektor kann beispielsweise auch durch jede andere resonante Struktur ersetzt werden, die an einen entsprechenden zur Rückkopplung ausgebildeten Wellenleiter der Laserstruktur gekoppelt werden kann. Eine mögliche Ausführungsform einer solchen resonanten Wellenleiterstruktur ist ein wellenleiterbasierter Ringresonator.

[0003] Die möglichen longitudinalen Moden und die zugehörigen Frequenzen des Lasers werden über die optische Länge dieser resonanten Wellenleiterstrukturen festgelegt. Ein Bragg-Gitter unterdrückt in der Regel alle Moden bis auf diejenige, deren Frequenz der Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters am nächsten liegt. Um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten, muss daher kontinuierlich die Frequenz des Lasers auf die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors, oder aber die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors auf die Frequenz des Lasers abgestimmt werden. Dazu muss bei der Anwendung die Abweichung der Laserfrequenz von der Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors sehr genau bestimmt werden. Das entsprechende Signal kann dann als Fehlersignal für ein entsprechendes Regelungssystem zur Abstimmung der einzelnen Komponenten des Lasers genutzt werden, so dass eine Stabilisierung der beiden Frequenzen aufeinander auch unter variablen Betriebsbedingungen (z. B. bei einem veränderlichen Injektionsstrom oder bei Temperaturschwankungen) erreicht wird. Die zuverlässige und genaue Ableitung eines Fehlersignals auch im unmittelbaren Nähe zur Resonanz stellt hierbei eine große technische Herausforderung dar.

[0004] DE 10 237 695 A1 beschreibt einen ECDL (engl. „external cavity diode laser“) mit Rückkopplung über einem Lichtwellenleiter mit eingeschriebenem Bragg-Gitter. Die resonatorinterne Leistung wird hierbei zur Ableitung eines Fehlersignals indirekt ermittelt, z. B. durch eine Monitor-Photodiode an der rückseitigen Facette des Laserchips oder durch die Bestimmung des Spannungsabfalls an der Laserdiode bei vorgegebenem Strom. Die resonatorinterne Leistung wird für zwei unterschiedliche Injektionsströme ermittelt. Die Differenz der beiden Messwerte liefert dann das Fehlersignal. Es geht gegen null, wenn die Laserfrequenz auf die Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters abgestimmt ist und wechselt das Vorzeichen, wenn auch die Differenz zwischen Laserfrequenz und Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters das Vorzeichen wechselt.

[0005] Das genutzte Verfahren erfordert das Schalten der Laserfrequenz zwischen zwei verschiedenen Frequenzen. Es ist daher für Anwendungen, die eine kontinuierliche Vermessung der Verstimmung zwischen Resonanzfrequenz des Bragg-Gitter und der Laserfrequenz erfordern, ungeeignet. Dies gilt für alle Anwendungen, bei denen die Frequenz eines Lasers kontinuierlich präzise auf eine vorgegebene Frequenz, z. B. die Frequenz eines atomaren Übergangs, stabilisiert werden muss, etwa für hochpräzise interferometrische Längenmessungen. Insbesondere kommt es hierbei auf ein besonders schnelles Regelverhalten auch schon bei kleinen Abweichungen um die gewünschte Emissionswellenlänge an.

[0006] WO 01/03258 A1 beschreibt ein Verfahren zur Stabilisierung der Resonanzfrequenz eines optischen Resonators auf die Frequenz eines Laserfeldes bzw. zur Stabilisierung der Frequenz eines Laserfeldes auf die Resonanzfrequenz eines optischen Resonators. Dazu wird das Lichtfeld eines Lasers leicht verkippt

gegen die optische Achse eines Spiegels des optischen Resonators in den optischen Resonator eingekoppelt. Auf einem geteilten Photodetektor interferieren das direkt am Spiegel reflektierte Feld sowie das aus dem Resonator ausgekoppelte Feld. Die Differenz der beiden Signale des geteilten Photodetektors wird als Fehlersignal für die relative Stabilisierung von Laserfrequenz und Resonanzfrequenz des Resonators genutzt.

[0007] Das Verfahren beruht darauf, dass (i) der leicht verkippte Eingangsstrahl als Überlagerung einer transversaler Grundmode und einer antisymmetrischen transversalen Obermode betrachtet werden kann und dass (ii) in der Regel bei geeigneter Wahl der Laserfrequenz bzw. Resonanzfrequenz des Resonators nur die transversale Grundmode in den Resonator eingekoppelt wird und dass (iii) bei Verstimmung der Laserfrequenz über die Resonanz der transversalen Grundmode des Resonators in der Ebene des Photodetektors eine Phasenverschiebung des Feldes der Grundmode relativ zur Phase des Feldes der Obermode erfährt, so dass die transversale Obermode als Phasenreferenz für die transversale Grundmode genutzt werden kann. Die Interferenz des direkt am Spiegel reflektierten Feldes und des aus dem Resonator ausgekoppelten Feldes führt in der Ebene des Photodetektors zu einer charakteristischen räumlichen Intensitätsverteilung, die wiederum von der Verstimmung zwischen der Frequenz des Laserfeldes und der Resonanzfrequenz der transversalen Grundmode des Resonators abhängt.

[0008] Das Verfahren basiert auf der zusätzlichen Einkopplung einer Probestrahlung (Obermode) in den Resonator. Es handelt sich dabei um einen konventionellen, aus einzelnen Komponenten mit Spiegeln aufgebauten optischen Resonator. Eine einfache Übertragung dieser Methode auf halbleiterbasierte integrierte Systeme ist im Allgemeinen nicht möglich. Sowohl die Bereitstellung eines Probestrahls als auch dessen mögliche Wechselwirkung mit der aktiven Zone des Lasers stellen hierbei besondere Schwierigkeiten dar.

[0009] Insbesondere ist das Prinzip somit nicht ohne erhebliche Aufwand auf die bei DBR Lasern verwendeten transversal grundmodigen Wellenleiterstrukturen übertragbar. Eine Übertragung des prinzipiellen Messverfahrens könnte beispielsweise durch die Überführung einer entsprechend geführten Welle in eine kohärente Überlagerung von transversaler Grund- und Obermode erfolgen. Hierzu kann ein wellenleiterbasierter transversaler Modenkoverter genutzt werden. Die beispielsweise von Dai et al. (Dai, D. et al., „Mode conversion in tapered submicron silicon ridge optical waveguides,“ Opt. Express 20, 13425 (2012)) beschriebenen Realisierungen besitzen allerdings nicht die benötigten Eigenschaften, weil keine entsprechende Kopplung, d. h. eine kohärente Überlagerung zwischen TE₀ als transversaler Grundmode und TE₁ als erster transversaler Obermode (oder analog hierzu TM₀ und TM₁), vermittelt wird.

[0010] EP 3 314 320 B1 betrifft einen wellenleiterbasierten Modenkoverter mit einer s-förmig gebogenen Verjüngung. Der Modenkoverter kann so konfiguriert werden, dass eine Modenumwandlung zwischen einer transversalelektrischen Grundmode (TE₀) und einer Zwischenmode, z. B. einer transversalelektrischen (TE) Mode höherer Ordnung, erfolgt.

Offenbarung der Erfindung

[0011] Es ist daher die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die Probleme des Standes der Technik zu überwinden oder zumindest zu verringern und insbesondere ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals für die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur zur Verfügung zu stellen, welches auch in der Nähe der Resonanzfrequenz eine starke Abhängigkeit von der gegenseitigen Verstimmung aufweist und bei transversal grundmodigen Wellenleiterstrukturen ohne eine zusätzliche Probestrahlung angewendet werden kann. Das Verfahren und die Vorrichtung sollen zur Frequenzstabilisierung bei Lasern und für Anwendungen in der Sensorik einsetzbar sein.

[0012] Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß durch die Merkmale der unabhängigen Patentansprüche 1 und 4 sowie 8 und 9 gelöst. Zweckmäßige Ausgestaltungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen enthalten.

[0013] Ein exemplarischer Modenkoverter zur Umwandlung einer Grundmode einer Wellenleiterstruktur in eine kohärente Überlagerung aus Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode umfasst einen Eingangswellenleiter mit einer ersten Breite w_1 zur Einkopplung der Grundmode in den Modenkoverter, wobei der Eingangswellenleiter zur Führung ausschließlich der Grundmode ausgebildet ist; einen Ausgangswellenleiter mit einer zweiten Breite w_2 größer als die erste Breite w_1 , wobei der Ausgangswellenleiter zur Führung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist; und einen sich zwischen dem Ein-

gangswellenleiter und dem Ausgangswellenleiter erstreckenden Verbindungswellenleiter, wobei sich die Breite $w(z)$ des Verbindungswellenleiters von der ersten Breite w_1 am Eingangswellenleiter zur zweiten Breite w_2 am Ausgangswellenleiter aufweitet, wobei der Eingangswellenleiter und der Ausgangswellenleiter einen lateralen und/oder vertikalen Versatz δ aufweisen.

[0014] Bei den einzelnen Wellenleitern kann es sich bevorzugt um Rippenwellenleiter handeln. Es können jedoch auch aufgesetzte, eingebettete und vergrabene Streifenwellenleiter sowie andere zu einer entsprechenden selektiven Modenführung ausgebildete Wellenleiterstrukturen verwendet werden. Neben planaren Wellenleiterstrukturen kann es sich auch um kreisförmige oder elliptische Wellenleiter (z. B. Glas- oder Kunststofffasern) und andere zu einer entsprechenden modenselektiven Ausbreitung fähigen Wellenleiterstrukturen handeln. Bei der Grundmode kann es sich insbesondere um die transversale Grundmode TE₀, bei der ersten Obermode um die erste transversale Obermode TE₁ handeln. Ebenfalls bevorzugt ist die Verwendung der transversalen Grundmode TM₀ sowie der ersten transversalen Obermode TM₁. Der Modenkonverter sollte derart ausgebildet sein, dass eine Kopplung zwischen TE- und TM-Moden vernachlässigt werden kann. Jeder transversalen Mode soll somit entweder die Eigenschaft transversalelektrisch (TE) oder die Eigenschaft transversal-magnetisch (TM) zugeordnet werden können.

[0015] Der Verbindungswellenleiter ist durch seine Breitenabhängigkeit $w(z)$ (z ist die Ausbreitungsrichtung der geführten Wellen) als annähernd trichterförmige Struktur ausgebildet. Solche Wellenleiterstrukturen sind an sich bereits bekannt und werden z. B. in der Trapezsektion von Trapezlasern eingesetzt. Im Unterschied dazu weist die beschriebene Wellenleiterstruktur jedoch einen lateralen oder vertikalen Versatz δ zwischen dem Eingangswellenleiter und dem Ausgangswellenleiter auf. Die Erstreckungsrichtung des Verbindungswellenleiters ist somit gegenüber dem Eingangswellenleiter und dem Ausgangswellenleiter verkippert. Durch diese Verkippung kommt es bei der Ausbreitung der Grundmode innerhalb des Verbindungswellenleiters zu einer Kopplung an die entsprechende Obermode, sobald durch die zunehmende Breite $w(z)$ des Verbindungswellenleiters dessen Führung ermöglicht wird. Die Stärke dieser Kopplung können insbesondere über den Versatz δ , die Länge des Verbindungswellenleiters und dessen spezifisches Aufweitungsprofil festgelegt werden.

[0016] Bevorzugt ist der laterale oder vertikale Versatz δ kleiner als die zweite Breite w_2 , bevorzugter kleiner als erste Breite w_1 . Der laterale oder vertikale Versatz δ kann jedoch auch größer als die zweite Breite w_2 sein. Der laterale oder vertikale Versatz δ beträgt vorzugsweise mindestens eine halbe Wellenlänge, bevorzugter mindestens eine Wellenlänge. Ein lateraler Versatz (x -Richtung, parallel zur Oberfläche des Substrates) ist aufgrund einer einfacheren Strukturierung bevorzugt, bei 3D-Strukturierungsverfahren kann jedoch auch ein vertikaler Versatz (y -Richtung, senkrecht zur Oberfläche des Substrats) genutzt werden. Die Länge des Verbindungswellenleiters beträgt vorzugsweise mehrere 10 μm , beispielsweise 100 μm oder 200 μm , für Wellenlängen im Bereich um etwa 1 μm . Hierbei sind eine typische erste Breite w_1 des Eingangswellenleiters 2,7 μm und eine typische zweite Breite w_2 des Ausgangswellenleiters 5 μm .

[0017] Der Modenkonverter ist vorzugsweise als passive Struktur ausgebildet. Bei anderen Ausführungsformen kann der Modenkonverter zumindest abschnittsweise auch aktiv ausgebildet sein. Bei einer aktiven Ausführungsform kann die erzeugte kohärente Überlagerung unmittelbar im Modenkonverter verstärkt werden.

[0018] Die Aufweitung innerhalb des Verbindungswellenleiters kann im einfachsten Fall linear erfolgen, es können jedoch andere Aufweitungsprofile realisiert werden. Insbesondere kann das Aufweitungsprofil auch einfach oder mehrfach gekrümmt ausgebildet werden. Ein Beispiel für eine zweifach gekrümmtes Aufweitungsprofil ist ein S-förmiger Verlauf (z. B. Sine-, Cosine-, S-Bend). Ein solcher Verlauf hat den Vorteil, dass die Krümmung des Verbindungswellenleiters an die Richtung des Eingangs- und des Ausgangswellenleiters angepasst werden kann, so dass bei der Transmission keine abrupten Änderungen im Krümmungsverhalten auftreten. Der links- und rechtsseitige (bzw. der obere und untere) Profilverlauf können identisch sein (z. B. zweiseitig linear) oder sich bevorzugt voneinander unterscheiden. Mit einem gekrümmten Aufweitungsprofil lässt sich ein Modenstripper realisieren, d. h. Strahlung, die in höhere als die erste laterale Obermode gekoppelt wird, wird abgestreift und in das Substrat bzw. die Umgebung des Wellenleiters abgestrahlt. Das Modestripping unterstützt das Bemühen, eine Rückstreuung von in Moden höherer Ordnung abgestrahlten Feldanteilen zurück in die Grundmode oder die entsprechende Obermode zu verhindern. Ferner wird der räumliche Überlapp der gestreuten mit der im Wellenleiter geführten Strahlung nach dem Austreten aus dem Wellenleiter reduziert.

[0019] Die Länge des Eingangs- und Ausgangswellenleiters können beliebig klein gewählt sein, insbesondere kommt es nur darauf an, dass die einzelnen Wellenleiter jeweils die Grundmode und der Ausgangswellenleiter zusätzlich die entsprechende Obermode führen können. Der Eingangs- und/oder der Ausgangswel-

lenleiter können auch unmittelbar durch angrenzend Wellenleiterstrukturen benachbarter Elemente ausgebildet sein. Beispielsweise können diese Wellenleiter auch von einem aktiven Wellenleiter eines Halbleiterlasers oder einem DBR-strukturierten Wellenleiter bereitgestellt werden.

[0020] In einer bevorzugten Ausführungsform eines Modenkonverters wird eine Kopplung der lateralen Grundmode mit einer antisymmetrischen lateralen Obermode realisiert. In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform koppelt die vertikale Grundmode mit einer antisymmetrischen vertikalen Obermode. Dies erfordert, dass das vertikale Design der Wellenleiter sich in den verschiedenen Bereichen unterscheidet. Aus Sicht der Halbleiterprozesstechnologie ist dies jedoch schwieriger umzusetzen. Besonderes bevorzugt handelt es sich bei einer angekoppelten antisymmetrischen Obermode um die erste (laterale oder vertikale) Obermode. Ebenfalls möglich ist die Kopplung einer lateralen und einer vertikalen Mode.

[0021] Bevorzugt ist, dass eine Grundmode ausschließlich mit einer einzelnen antisymmetrischen Obermode gekoppelt wird oder diese Kopplung zumindest die Kopplung an alle anderen geführten Moden des zugehörigen Wellenleiters übertrifft. Übertreffen bedeutete dabei, dass mindestens 90 % der aus der Grundmode in höhere Wellenleitermoden überkoppelten Energie in eine einzelne antisymmetrische Obermode übertragen werden. Vorzugsweise ist der Ausgangswellenleiter zur Führung ausschließlich der Grundmode und der angekoppelten antisymmetrischen Obermode ausgebildet. Dies kann beispielsweise durch eine entsprechende Strukturierung der Oberfläche des Wellenleiters erreicht werden. Insbesondere kann bei einer bevorzugten Ausführungsform eines Modenkonverters zur Umwandlung einer Grundmode einer Wellenleiterstruktur in eine kohärente Überlagerung aus Grundmode und erster Obermode der Ausgangswellenleiter zur Führung ausschließlich der Grundmode und der ersten Obermode ausgebildet sein.

[0022] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform unterscheiden sich sowohl das laterale als auch das vertikale Design der Wellenleiter. Dies kann erforderlich sein, weil weitere Bedingungen an das Design, die sich aus der konkreten Anwendung ergeben, eine Variation sowohl des lateralen als auch des vertikalen Wellenleiterdesigns in unterschiedlichen Bereichen erfordern.

[0023] Die gemeinsame Eigenschaft aller Ausführungsformen ist, dass die Symmetrie der Wellenleitung bezüglich der Mitte des Wellenleiters gebrochen wird. Insbesondere kann das optische Design der Wellenleiterstruktur derart ausgelegt sein, dass die Symmetrie der Wellenleiterstruktur so gebrochen wird, dass eine Kopplung zwischen der Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode bzw. der ersten Obermode erfolgt.

[0024] Bevorzugt werden Grundmode und erste Obermode gekoppelt. Prinzipiell kann der Modenkonverter jedoch auch so ausgelegt werden, dass er die Grundmode mit anderen Moden höherer, ungerader Ordnung koppelt. Hierzu ist eine im Vergleich zur bevorzugten Ausführungsform der Kopplung (Grundmode mit erster Obermode) stärkere Kopplung erforderlich, die in der Regel mit stärkeren Verlusten einhergeht und damit nachteilig ist. Zudem ist eine selektive Ankopplung an höhere Moden ohne eine gleichzeitige Anregung zwischenliegender Moden oder eine Ausbildung des Wellenleiters zur selektiven Führung nur einzelner Moden oft nur mit hohem Aufwand realisierbar.

[0025] Mit einem Modenkonverter kann eine Grundmode verlustarm und ohne Kopplung an andere Polarisationsmoden in eine kohärente Überlagerung insbesondere von Grundmode und erster lateraler Obermode überführt werden. Ein beschriebener Modenkonverter koppelt sowohl TE₀ mit TE₁ also auch TM₀ mit TM₁, kann also für beide Polarisationsrichtungen eingesetzt werden. Eine Kopplung der Polarisationsrichtungen (d. h. zwischen TE und TM) erfolgt nicht. Wesentlich ist hierbei, dass die effektiven Brechungsindizes der lateralen Moden zur gleichen Polarisation sich stärker voneinander unterscheiden als die effektiven Brechungsindizes von Moden gleicher Ordnung aber unterschiedlicher Polarisation.

[0026] Ein Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ableitung eines Fehlersignals für die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur, umfassend die Schritte einer Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung einer Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung mit einer ersten Phasenverschiebung in einem Wellenleiter, wobei der Wellenleiter zur Führung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist; einer Einkopplung der kohärenten Überlagerung in die resonante Wellenleiterstruktur, wobei die resonante Wellenleiterstruktur zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung bei einer von der Modendispersion zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode abhängigen Phasenverschiebung ausgebildet ist; einer Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode

und der antisymmetrischen Obermode aus der resonanten Wellenleiterstruktur auf eine Detektionseinrichtung; einer Messung eines Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung mittels der Detektionseinrichtung; und einer Ableitung eines Fehlersignals aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis bei der zweiten Phasenverschiebung unter Berücksichtigung der ersten Phasenverschiebung und einer im Resonanzfall auftretenden Restphasenverschiebung zwischen Bereitstellung und Auskopplung.

[0027] Vorzugsweise wird eine kohärente Überlagerung einer Grundmode und einer ersten Obermode (entspricht der kleinsten antisymmetrischen Obermode) der Referenzstrahlung mit einer ersten Phasenverschiebung im Wellenleiter bereitgestellt. Bevorzugt ist der Wellenleiter zur Führung ausschließlich der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode (bzw. der ersten Obermode) ausgebildet. Die kohärente Überlagerung betrifft vorzugsweise jeweils die laterale Grundmode und die antisymmetrische laterale Obermode (bzw. die erste laterale Obermode) des Wellenleiters. Die kohärente Überlagerung kann jedoch auch die entsprechenden vertikalen Moden betreffen.

[0028] Ebenfalls möglich ist die kohärente Überlagerung einer lateralen und einer vertikalen Mode.

[0029] Vorzugsweise kann die Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung über einen Ausgangswellenleiter eines Modenkonzerters durch Einkopplung einer Referenzstrahlung in einen Eingangswellenleiter des Modenkonzerters erfolgen. Bei der Referenzstrahlung kann es sich insbesondere um eine zu stabilisierende Laserstrahlung oder Strahlung einer anderweitig stabilisierten Referenzquelle handeln. In einer bevorzugten alternativen Ausführungsform erfolgt die Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung durch schräge Einkopplung einer Referenzstrahlung in den Wellenleiter. Dies kann insbesondere mittels Freistrahkopplung (z. B. über eine Facette am Ende des Wellenleiters) oder durch Kopplung an einer scharfen Knickstelle im Verlauf des Wellenleiters erfolgen. Der Wellenleiter kann vom Typ, seinem Aufbau und den zugehörigen Abmessungen dem zweiten Wellenleiter eines vorstehend beschriebenen Modenkopplers entsprechen. Die diesbezüglichen Ausführungen gelten daher entsprechend.

[0030] Zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode kann es aufgrund unterschiedlicher effektiver Brechungsindizes im Wellenleiter zu leicht unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten kommen, wodurch sich eine veränderliche gegenseitige Phasenverschiebung einstellt. Bei der Bereitstellung weist diese einen ersten Wert auf. Dieser kann jedoch frei gewählt und insbesondere auch als null angenommen werden.

[0031] Die bereitgestellte kohärente Überlagerung wird in die resonante Wellenleiterstruktur eingekoppelt. Die kann beispielsweise über eine direkte Verbindung mit dem Wellenleiter erfolgen. Die Einkopplung kann jedoch auch auf andere Art und Weise erfolgen. Insbesondere kann die Einkopplung auch über evaneszente Kopplung oder als Freistrahkopplung (bzw. mittels einer nicht geführten Ausbreitung) erfolgen. Bei einer resonanten Wellenleiterstruktur kann es sich um eine beliebig geformte wellenführende Struktur handeln, in welcher sich eine Resonanz für die geführte Welle ausbildet. Insbesondere kann es sich um eine in die Wellenleiterstruktur ein- oder aufgebrachte gebrachte Gitterstruktur (z. B. Bragg-Gitter) oder eine entsprechende Modulation im Brechungsindex des Wellenleiters (integrierter dielektrischer Bragg-Spiegel) handeln. In einer bevorzugten Ausführungsform kann es sich bei der resonanten Wellenleiterstruktur um einen optischen Ringresonator oder eine beliebige andere interferometrische Wellenleiterstruktur handeln.

[0032] Voraussetzung zur Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist lediglich, dass die resonante Wellenleiterstruktur zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung bei einer von der Modendispersion zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode abhängigen Phasenverschiebung ausgebildet ist. Unter Modendispersion wird die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Ausbreitungsmoden verstanden, d. h. eine sich für Wellen gleicher Frequenz bei einer Ausbreitung in unterschiedlichen Ausbreitungsmoden der resonanten Wellenleiterstruktur einstellende gegenseitige Phasenverschiebung. Die Größe dieser Phasenverschiebung φ ergibt sich dabei beispielsweise als Wegintegral der differentiellen gegenseitigen Phasenverschiebung $\delta\varphi/\delta s$ über die Resonatorlänge L . Die genannte Voraussetzung ist bei den meisten resonanten Wellenleiterstrukturen gegeben. Bevorzugt werden die Grundmode als auch die antisymmetrische Obermode in die resonante Wellenleiterstruktur eingekoppelt. Da es für die Ableitung eines Fehlersignals jedoch nur auf eine Messung der durch die resonante Wellenleiterstruktur bewirkten gegenseitigen Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ankommt, genügt es prinzipiell auch, wenn nur die Grundmode oder die antisymmetrische Obermode in die

resonante Wellenleiterstruktur eingekoppelt wird und diese anschließend wieder mit dem entsprechenden Modenpartner überlagert wird. Die Kohärenz der Überlagerung muss dabei jedoch erhalten bleiben.

[0033] Der nächste Schritt umfasst eine Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode auf eine Detektionseinrichtung. Die zweite Phasenverschiebung ergibt sich dabei als Summe der ersten Phasenverschiebung, der erfindungsgemäß auftretenden Phasenverschiebung durch die resonante Wellenleiterstruktur und einer eventuellen zusätzlich auftretenden Restphasenverschiebung bei der Ausbreitung der kohärenten Überlagerung zwischen dem Bereitstellungs- und dem Auskopplungspunkt (z. B. vom Wellenleiter bei der Bereitstellung bis zur Detektionseinrichtung). Die Auskopplung kann analog zur Einkopplung auf verschiedene Art und Weise erfolgen. Insbesondere kann auch hierbei ein Wellenleiter als Auskoppler genutzt werden, wobei dieser direkt oder evaneszent an die resonante Wellenleiterstruktur angekoppelt werden kann. In einer weiteren Ausführungsform kann die Auskopplung über einer nicht wellenleitergeführten Ausbreitungsstrecke erfolgen.

[0034] Mittels einer erfindungsgemäßen Detektionseinrichtung kann ein Asymmetrie-Verhältnis der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung gemessen werden. Unter einem Asymmetrie-Verhältnis ist dabei eine Verlagerung des Schwerpunktes der gemessenen Intensitätsverteilung in lateraler bzw. vertikaler Richtung in Bezug auf die weitgehend symmetrische Intensitätsverteilung der Grundmode zu verstehen. Durch die kohärente Überlagerung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode überlagern sich deren jeweilige Intensitätsverteilungen. Dabei kommt es in Abhängigkeit von der beiderseitigen Phasenverschiebung zu einer Verschiebung der gemessenen Intensitätsverteilung entsprechend der Ausrichtung der beiden Amplitudenmaxima der Obermode. Ein Asymmetrie-Verhältnis kann daher im einfachsten Fall beispielsweise Werte zwischen -1 und 1 annehmen, wobei bei den genannten Maximalwerten jeweils eine einseitige Intensitätsverteilung in unterschiedlichen Richtungen und der Wert 0 einer symmetrischen Intensitätsverteilung entspricht. Ein Asymmetrie-Verhältnis kann jedoch auch auf andere für die Ableitung eines Fehlersignals geeignete Weise definiert werden. Insbesondere können auch weitere charakteristische Merkmale in der Intensitätsverteilung explizit mit berücksichtigt werden.

[0035] Aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis kann schließlich ein Fehlersignal abgeleitet werden. Hierbei ist die zweite Phasenverschiebung unter Berücksichtigung der ersten Phasenverschiebung und einer im Resonanzfall auftretenden Restphasenverschiebung zwischen der Bereitstellung am Bereitstellungspunkt und der Auskopplung am Auskopplungspunkt zu berücksichtigen. Für das Fehlersignal kommt es daher nicht auf ein absolutes Asymmetrie-Verhältnis an, vielmehr ist bei der Ableitung eines Fehlersignals allein die relative Veränderung des Asymmetrie-Verhältnisses, d. h. die relative Veränderung der sich bei der Ausbreitung innerhalb der resonanten Wellenleiterstruktur aufbauenden gegenseitigen Phasenverschiebung zwischen Grundmode und entsprechender Obermode, relevant. Eine Berücksichtigung der anderen Phasenverschiebungen kann durch Herausrechnen einer bekannten Restphasenverschiebung erfolgen. Die erste Phasenverschiebung stellt im Wesentlichen lediglich ein Offset dar, welches die Resonanzlage innerhalb des gegebenen Asymmetrie-Verhältnis-Spektrums verschiebt. Eine Berücksichtigung der Phasenverschiebung kann auch durch eine entsprechend ausgebildete Verzögerungsstrecke erfolgen. Beispielsweise kann durch eine passende Länge eines Wellenleiters vor oder nach der resonanten Wellenleiterstruktur die Resonanzlage auf die Mitte des Asymmetrie-Verhältnis-Spektrums eingestellt werden. In diesem Fall kann durch das Vorzeichen des Asymmetrie-Verhältnisses auch unmittelbar das Vorzeichen des Fehlersignals festgelegt sein.

[0036] Eine erfindungsgemäßes Verfahren zur Ableitung eines Resonator-Fehlersignals für eine wellenleiterbasierte resonante Struktur hat gegenüber alternativen Verfahren den Vorteil, dass es eine Verschiebung der Resonanzfrequenz der Wellenleiterstruktur direkt und nicht indirekt erfasst. Ferner können für die interferometrische Messung der Referenz (antisymmetrische Obermode) und des Messfeldes (Grundmode) durch den gleichen Wellenleiter geführt werden. Störungen, z. B. bezüglich mechanischer Verspannungen, Temperaturschwankungen oder anisotroper Temperaturverteilungen wirken sich daher in hohem Maße gleich auf die Propagation der beiden Felder aus, weshalb eine hohe Gleichtaktunterdrückung dieser Störeffekte erreicht werden kann.

[0037] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Ableitung eines Fehlersignals für die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur mittels eines erfindungsgemäßen Verfahrens, umfassend einen Wellenleiter, wobei der Wellenleiter zur Führung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist; eine resonante Wellenleiterstruktur, wobei die

Grundmode und/oder die antisymmetrische Obermode aus dem Wellenleiter als kohärente Überlagerung in die resonante Wellenleiterstruktur eingekoppelt werden können und die resonante Wellenleiterstruktur zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung bei einer von der Modendispersion abhängigen Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist; eine Detektionseinrichtung, wobei eine Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung auf die Detektionseinrichtung erfolgt und die Detektionseinrichtung zur Messung des Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung eingerichtet ist; und ein Mittel zur Auswertung, ausgebildet zur Ableitung eines Resonanz-Fehlersignals aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis.

[0038] Eine erfindungsgemäße Vorrichtung soll zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens geeignet sein. Entsprechend sind alle für die Durchführung der einzelnen Schritte eines erfindungsgemäßen Verfahrens erforderlichen Vorrichtungsmerkmale aufgeführt. Deren spezifische Aufgabe, die funktionalen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Merkmalen sowie deren jeweils bevorzugte Ausführungsformen ergeben sich daher unmittelbar aus der entsprechenden verfahrenstechnischen Beschreibung, auf welche an dieser Stelle lediglich verwiesen wird.

[0039] Vorzugsweise umfasst eine erfindungsgemäße Vorrichtung einen Modenkonverter, dazu eingerichtet, eine in einen Eingangswellenleiter des Modenkonverters eingekoppelte Referenzstrahlung als kohärente Überlagerung einer Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung in den Wellenleiter einzukoppeln. Die zur Ableitung eines Fehlersignals erforderliche kohärente Überlagerung wird somit durch einen Modenkonverter bereitgestellt.

[0040] Vorzugsweise umfasst die Detektionseinrichtung einen Zeilen- oder Flächendetektor (z. B. CCD). Die aktive Fläche des Detektors sollte dabei zur Messung des Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung die Intensitätsverteilung vollständig erfassen können. Mittels eines Flächendetektors kann die Intensitätsverteilung unmittelbar als solche erfasst und zur Bestimmung des Asymmetrie-Verhältnisses bzw. eines Fehlersignals herangezogen werden. Ein Flächendetektor hat dabei den Vorteil, dass auch Störungen bei der Wellenleitung unmittelbar durch Veränderungen in der Form der gemessenen Intensitätsverteilung erkannt werden können. Auch mit einem Zeilendetektor kann eingeschränkt eine räumlich aufgelöste Erfassung der Intensitätsverteilung erfolgen.

[0041] Vorzugsweise umfasst die Detektionseinrichtung mindestens zwei Einkanal-detektoren, wobei die Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung aus der resonanten Wellenleiterstruktur auf die Einkanal-detektoren unmittelbar oder über eine evaneszent angekoppelte monomodige Wellenleitergabel erfolgt. Bevorzugt sollten auch bei dieser Ausführungsform die Einkanal-detektoren zur Messung des Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung die Intensitätsverteilung vollständig erfassen können. Bei Einkanal-detektoren kann es sich bevorzugt um Photodioden, insbesondere um integrierte Photodiodenstrukturen, handeln. Die beiden Einkanal-detektoren können auch als geteilte Photodiodenstruktur ausgebildet sein. Wesentlich ist hierbei die Möglichkeit für eine zur Messung eines Asymmetrie-Verhältnisses geeignete getrennte Erfassung des auf die Detektionseinrichtung ausgekoppelten Intensitätsverteilung. Die Einkanal-detektoren können auch als Tetra-Lateral-Diode ausgebildet sein.

[0042] Unter einer unmittelbaren Auskopplung wird insbesondere eine direkte oder evaneszente strahlen- bzw. wellenoptische Anbindung über einen Wellenleiter oder eine Kopplung mittels Freistrahl (bzw. mittels einer nicht wellengeführten Ausbreitung) verstanden. Es können weitere optische Komponenten (z. B. Linsen, Spiegel und/oder Filter) zwischen der resonanten Wellenleiterstruktur und der Detektionseinrichtung angeordnet sein.

[0043] Bei der evaneszent angekoppelten monomodigen Wellenleitergabel liegt das zur Ableitung eines Fehlersignals gemessene Asymmetrie-Verhältnis auch innerhalb eines entsprechenden Wellenleiters vor. Dieses führt dazu, dass bei einer Nutzung der transversalen Obermode zur Ableitung eines Fehlersignals eine evaneszente Kopplung an zwei ebenfalls in transversaler Richtung links- und rechtseitig benachbart angeordnete monomodige Wellenleiter ebenfalls asymmetrisch entsprechend des resultierenden Asymmetrie-Verhältnisses erfolgt (entsprechendes gilt bei Nutzung der vertikalen Obermode). Da die beiden Wellenleiter nur zur Führung der jeweiligen Grundmode ausgebildet sind, ist das sich in den beiden Armen der Wellenleitergabel bei der Kopplung einstellende Intensitätsverhältnis zum zu messenden Asymmetrie-Verhältnis äquivalent. Eine Messung des Asymmetrie-Verhältnisses kann daher am Ausgang der Wellenleitergabel durch zwei Einkanal-detektoren (z. B. Photodioden) erfolgen.

[0044] Ein weiter Aspekt der Erfindung betrifft einen Laser, dadurch gekennzeichnet, dass eine Frequenzstabilisierung der Emission des Lasers mittels des abgeleiteten Fehlersignals einer erfindungsgemäßen Vorrichtung erfolgt. Bei dem Laser kann es sich insbesondere um einen Halbleiterlaser (z. B. einen DBR-Laser) handeln. Insbesondere kann eine Frequenzstabilisierung der Emission des Lasers auf die Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur erfolgen. Die erfindungsgemäße Vorrichtung ist jedoch nicht auf Halbleiterlaser oder integrierte Laserstrukturen beschränkt. Vielmehr kann eine erfindungsgemäße Vorrichtung bei allen durch Rückkopplung stabilisierbaren Lasertypen und insbesondere bei allen Lasertypen mit Wellenleitern zur Lichtführung Anwendung finden. Bei den Wellenleitern kann es sich neben planar integrierten Wellenleiterstrukturen auch um kreisförmige oder elliptische Wellenleiter (z. B. Glas- oder Kunststofffasern) und andere zu einer entsprechenden modenselektiven Ausbreitung fähigen Wellenleiterstrukturen handeln. Das abgeleitete Fehlersignal kann dann unmittelbar bei den aus dem Stand der Technik zur Stabilisierung eines Lasers bekannten Methoden (z. B. thermisches Verstimmen, Anpassung des Injektionsstroms) angewendet werden.

[0045] Ein weiter Aspekt der Erfindung betrifft einen Sensor, umfassend eine erfindungsgemäße Vorrichtung, wobei die Vorrichtung dazu ausgebildet ist, eine Veränderung der Resonanzeigenschaften der resonanten Wellenleiterstruktur aufgrund äußerer Einflüsse über das abgeleitete Fehlersignal funktional zu erfassen. Eine Sensorik über resonante Wellenleiterstrukturen ist im Stand der Technik bereits bekannt. Hierbei wird zumeist durch eine Verschiebung der Resonanz einer resonanten Wellenleiterstruktur ein veränderlicher äußerer Parameter erfasst. Hierzu sollte die Abhängigkeit der Frequenzveränderung als Funktion des äußeren Parameters bekannt sein. Die Referenzstrahlung kann bevorzugt als stabil angesehen werden. Das abgeleitete Fehlersignal gibt somit die Abweichung von der Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur zur Referenzstrahlung an. Wie schon der erfindungsgemäße Laser ist auch ein erfindungsgemäßer Sensor nicht auf integrierte Systeme beschränkt und kann ganz allgemein bei allen entsprechenden Sensorsystemen verwendet werden.

[0046] Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den in den Unteransprüchen genannten Merkmalen.

[0047] Die verschiedenen in dieser Anmeldung genannten Ausführungsformen der Erfindung sind, sofern im Einzelfall nicht anders ausgeführt, mit Vorteil miteinander kombinierbar.

Figurenliste

[0048] Die Erfindung wird nachfolgend in Ausführungsbeispielen anhand der zugehörigen Zeichnung erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der (normierten) Intensitätsverteilung für die transversalen Feldverteilungen für die a) TE₀ und b) TE₀ und TE₁ in exemplarischen Wellenleitern unterschiedlicher Breite w ;

Fig. 2 eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten und b) zweiten Ausführungsform eines Modenkopplers;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten, b) zweiten und c) dritten Ausführungsform einer Detektionseinrichtung;

Fig. 4 eine schematische Darstellung der lateralen Feldverteilungen von Grund- und erster Obermode sowie dessen Überlagerung bei unterschiedlicher Phasenverschiebung;

Fig. 5 eine schematische Darstellung der Intensitätsverteilung an der Detektionseinrichtung nach einer erfindungsgemäßen Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung aus der resonanten Wellenleiterstruktur;

Fig. 6 eine schematische Darstellung einer exemplarischen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lasers; und

Fig. 7 eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten und b) zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Sensors.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

[0049] **Fig. 1** zeigt eine schematische Darstellung der (normierten) Intensitätsverteilung für die transversalen Feldverteilungen für die a) TE₀ und b) TE₀ und TE₁ in exemplarischen Wellenleitern unterschiedlicher Breite w . Bei den Wellenleitern handelt sich um planare Rippenwellenleiter. Beispielsweise kann es sich hierbei um

die geführten Moden a) in einem Eingangswellenleiter 12 und b) in einem Ausgangswellenleiter 16 eines Modenkonverters 10 handeln. Die Berechnung des zugehörigen Confinement-Faktors (siehe Tabelle 1) bei einem exemplarischen Modenkonverter 10 zeigt, dass der Eingangswellenleiter 12 nur die Grundmode (TE₀), der Ausgangswellenleiter 16 nur die Grund- und erste Obermode (TE₀ und TE₁) führen. Über die Breite w der Rippe des gezeigten Wellenleiters kann somit das Modenspektrum des Wellenleiters eingestellt werden. Für einen vertikal grundmodigen Wellenleiter ergibt sich die Intensitätsverteilung in vertikaler Richtung annähernd durch Drehung der in a) für laterale Richtung gezeigten Intensitätsverteilung.

[0050] Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten und b) zweiten Ausführungsform eines Modenkonverters 10. Insbesondere wird das Konzept eines Modenkonverters 10 gezeigt, welcher nur die vertikale Grundmode führt. Links und rechts sind der Eingangswellenleiter 12 bzw. der Ausgangswellenleiter 16 als Rippenwellenleiter im Querschnitt dargestellt. Beim Ausgangswellenleiter 16 sind die Rippe und damit der Wellenleiter breiter als beim Eingangswellenleiter 12, wobei das zugehörige Modenspektrum bzw. die zugehörigen Intensitätsverteilungen für laterale (d. h. in x -Richtung ausgerichtete) Moden den in Fig. 1 gezeigten Abbildungen entsprechen. Die Breite des Eingangswellenleiters 12 ist so gewählt, dass er nur die Grundmode verlustarm führt, während die Breite des Ausgangswellenleiters 16 so gewählt ist, dass er nur die Grundmode und die erste Obermode verlustarm führt.

[0051] Der mittlere Abschnitt zeigt den Verbindungswellenleiter 14 in der Aufsicht. Die Breite $w(z)$ des Verbindungswellenleiters 14 vergrößert sich von links nach rechts. Der Eingangswellenleiter 12 und der Ausgangswellenleiter 16 weisen in den gezeigten Ausführungsform einen lateralen Versatz δ zueinander auf. Vorzugsweise liegt dieser Versatz in der Größenordnung der geführten Wellenlänge. Der Versatz bricht die laterale Symmetrie der Gesamt-Wellenleiterstruktur und ermöglicht so eine kohärente Kopplung von Grundmode und erster Obermode. Die Symmetriebrechung ist das wesentliche physikalische Merkmal eines entsprechenden Modenkonverters 10. Das in Abbildung a) gezeigte Aufweitungsprofil ist einseitig linear. Das in Abbildung b) gezeigte Aufweitungsprofil ist einseitig S-förmig. Analog zu den gezeigten Ausführungsbeispielen kann für vertikale (d. h. in y -Richtung ausgerichtete) Moden ebenfalls eine entsprechende Strukturierung erfolgen.

[0052] Die erste Breite w_1 des Eingangswellenleiters 12 und die zweite Breite w_2 des Ausgangswellenleiters 16 ergeben sich bei einem vorgegebenem vertikalen Design der Wellenleiterstruktur aus der Anforderung, nur die Grundmode bzw. nur die Grundmode und die erste Obermode zu führen. Designparameter für den gezeigten Modenkonverter 10 mit einem Rippenwellenleiter sind daher (i) die Länge des Verbindungswellenleiters 14, (ii) der laterale Versatz δ zwischen dem Eingangswellenleiter 12 und dem Ausgangswellenleiter 16 und (iii) die laterale Position der Mitte und die Breite w jeweils entlang der longitudinalen Richtung des Modenkonverters 10 (Aufweitungsprofil in z -Richtung). Ein größerer lateraler Versatz δ zwischen dem Eingangswellenleiter 12 und dem Ausgangswellenleiter 16 bei gleicher Länge führt zu größeren Verlusten und stärkerer Kopplung. Eine kürzere Länge bei gleichem Versatz δ führt ebenfalls zu größeren Verlusten und stärkerer Kopplung. Durch geeignete Wahl von Länge, Versatz δ und Aufweitungsprofil kann die gewünschte Kopplung bei vorgegebenen zulässigen Verlusten erreicht werden. Im Grenzfall großer Längen wird ein adiabatischer Übergang erreicht, wobei eine Kopplung auch geringfügig in Moden erfolgt, die nicht verlustarm geführt werden.

[0053] In Tabelle 1 ist beispielhaft die Beschreibung des Designs und der Eigenschaften des unter a) dargestellten Modenkonverters 10 angegeben. Betrachtet werden die Eigenschaften des Modenkonverters für TE-Moden. Der Confinement-Faktor ist dabei als der Anteil der optischen Leistung vertikal innerhalb des Wellenleiterkerns und lateral unterhalb der Rippe definiert.

[0054] Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten, b) zweiten und c) dritten Ausführungsform einer Detektionseinrichtung 40. Bei der unter a) gezeigten ersten Ausführungsform erfolgt eine Auskopplung einer gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der ersten Obermode auf die Detektionseinrichtung 40 mit Hilfe eines Wellenleiters 42. Dessen Ausgang wird mit einer geeigneten Detektoreinrichtung detektiert. Bei der Detektoreinrichtung kann es sich um einen Flächendetektor 44 handeln. Die Detektoreinrichtung kann auch aus mindestens zwei Einkanal-detektoren 44a, 44b bestehen. Insbesondere kann mit einem geteilten Photodetektor das Asymmetrie-verhältnis einer darauf ausgekoppelten Feldverteilung ermittelt werden. Die Differenz der beiden Signale, welche über ein Differenzverstärker 46 ermittelt werden kann, kann dann zur erfindungsgemäßen Ableitung eines entsprechenden Resonanz-Fehlersignals F genutzt werden.

[0055] Bei der unter b) gezeigten zweiten Ausführungsform erfolgt eine Auskopplung einer gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der ersten Obermode auf die Detektionseinrichtung 40 ebenfalls mit Hilfe eines Wellenleiters 42. Bei dieser Ausführungsform können zwei Einkanal-detektoren 44a, 44b (z. B. Photodetektoren) unmittelbar links- und rechtsseitig (bzw. ober- und unterhalb bei Verwendung vertikaler Moden) neben den Wellenleiter 42 platziert und durch eine evaneszente Kopplung an den Wellenleiter 42 zum Messen genutzt werden. In einer weiteren nicht explizit gezeigten Ausführungsform kann das Feld mit einem halbleitertechnologisch in die Struktur eines in den Wellenleiter 42 integrierten Bragg-Reflektors auch vertikal aus der Ebene des Wellenleiters 42 heraus ausgekoppelt werden.

[0056] Auch bei der unter c) gezeigten dritten Ausführungsform erfolgt eine Auskopplung einer gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der ersten Obermode auf die Detektionseinrichtung 40 mit Hilfe eines Wellenleiters 42. Diese Ausführungsform entspricht vom Detektionsprinzip weitgehend der unter b) gezeigten Ausführungsform. Die zwei Einkanal-detektoren 44a, 44b (z. B. Photodetektoren) werden hier jedoch nicht unmittelbar an den Wellenleiter 42 gekoppelt, sondern es wird eine monomodige Wellenleitergabel 48 genutzt. Da die beiden Wellenleiter der Wellenleitergabel 48 nur zur Führung der jeweiligen Grundmode ausgebildet sind, ist das sich in den beiden Armen der Wellenleitergabel 48 bei der Kopplung einstellende Intensitätsverhältnis zum zu messenden Asymmetrie-Verhältnis äquivalent. Eine Messung des Asymmetrie-Verhältnisses kann am Ausgang der Wellenleitergabel wieder durch zwei Einkanal-detektoren 44a, 44b erfolgen. Durch evaneszente Kopplung wird das Feld aus dem zentralen Wellenleiter in die Arme der Wellenleitergabel 48 (auch als „Tap“-Wellenleiter bezeichnet) eingekoppelt. Dabei wird mehr Leistung in jenen Arm gekoppelt, der dichter am Schwerpunkt der Intensitätsverteilung des zentralen Wellenleiters 42 liegt.

[0057] Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung der lateralen Feldverteilungen von Grund-(TE0) und erster Obermode (TE1) sowie dessen Überlagerung (TE0 & TE1) bei unterschiedlicher Phasenverschiebung. Dies entspricht insbesondere den lateralen Feldverteilungen nach Auskopplung der kohärenten Überlagerung auf eine Detektionseinrichtung. Für die dargestellten Feldverteilungen wurde das Feld der ersten Obermode einmal mit dem Feld der Grundmode aufsummiert („konstruktive Interferenz“) und einmal von ihm subtrahiert („destruktive Interferenz“). Die beiden Feldverteilungen entsprechen einer Verstimmung der Frequenz des optischen Feldes nach sehr niedrigen bzw. sehr hohen Frequenzen relativ zur Resonanzfrequenz für die laterale Grundmode. Deutlich zu erkennen ist, dass sie den beiden Grenzfälle einer asymmetrischen Intensitätsverteilung entsprechen, bei der der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung einmal links und einmal rechts von der Mitte des entsprechenden Wellenleiters liegen.

[0058] Eine Bestimmung der lateralen Lage des Zentrums der Intensitätsverteilung relativ zum lateralen geometrischen Zentrum des Wellenleiters liefert also eine vorzeichenbehaftete Information über die momentane Verstimmung der Frequenz des Feldes von der Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur der lateralen Grundmode. Wenn die Frequenz des optischen Feldes den Resonanzwert für die Grundmode annimmt, kann bei einer geeigneten Gesamtphasenverschiebung der Vorrichtung eine symmetrische Intensitätsverteilung eingestellt werden. Dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich, da sich das Asymmetrie-Verhältnis kontinuierlich mit der Phasenverschiebung ändert und somit nur die Lage der Resonanz im Asymmetrie-Verhältnis-Spektrum bekannt sein muss.

[0059] Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung der Intensitätsverteilung an der Detektionseinrichtung 40 nach einer erfindungsgemäßen Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung aus der resonanten Wellenleiterstruktur 34 entsprechend die in Fig. 4 gezeigten Querschnitte.

[0060] Die gleichfrequenten Felder der Grundmode und der ersten Obermode erfahren bei Propagation durch einen die Grundmode und erste Obermode führenden Wellenleiter eine relative Phasenverschiebung selbst dann, wenn der Brechungsindex des Wellenleiters nicht räumlich moduliert wird (eine entsprechende Phasenverschiebung tritt im Allgemeinen auch zwischen der Grundmode und höheren Obermoden auf). Grund dafür ist der Unterschied zwischen den effektiven Brechungsindizes von Grundmode und erster Obermode. Dieser Unterschied führt zu einer zusätzlichen Phasenverschiebung zwischen den Feldern der Grundmode und der ersten Obermode, die, zumindest für Frequenzverstimmungen von der Größenordnung der Bandbreite eines Bragg-Reflektors als resonante Wellenleiterstruktur, linear mit der Verstimmung der optischen Frequenz des Feldes von der Bragg-Frequenz skaliert. Der Effekt führt dazu, dass, wenn der Wert der Frequenz des optischen Feldes der Bragg-Frequenz für die laterale Grundmode entspricht, bei der Auskopplung auf eine Detektionseinrichtung die Phasenverschiebung zwischen den optischen Feldern von Grundmode und erster Obermode nicht zu einer symmetrischen Intensitätsverteilung führen muss, sondern diese

auch im Resonanzfall davon abweichen kann. Durch geeignete Wahl der Gesamtlänge aller involvierten Wellenleiter kann die Nullage jedoch entsprechend eingestellt werden. Die durch diesen Effekt bewirkte Phasenverschiebung wird über eine zu berücksichtigende Restphasenverschiebung beim erfindungsgemäßen Verfahren bereits mit berücksichtigt.

[0061] Bei einem effektiven Brechungsindex von etwa $n_{\text{eff}} = 3$ (typisch für GaAs-basierte Wellenleiter) und einem Unterschied zwischen den effektiven Brechungsindizes von Grundmode und erster Obermode von etwa 10^{-3} sind für die Einstellung der gewünschten Phasendifferenz ein passiver Wellenleiter mit einer physikalische Länge von nicht mehr als 150 Vakuum-Wellenlängen (also typischerweise $150 \mu\text{m}$) erforderlich. Die Einstellung der Phasendifferenz ist also nach dem Stand der Technik mit der gewünschten Größe und Genauigkeit möglich.

[0062] Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung einer exemplarischen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Lasers 60. Insbesondere kann es sich hierbei um einen DBR-Laser handeln. Insbesondere handelt es sich um eine Ausführungsform mit aktiven und passiven Rippenwellenleiter-Sektionen, die entweder transversal grundmodig sind oder die transversale Grundmode und eine antisymmetrische transversale Obermode, bevorzugt die erste transversale Obermode, führen. Eine der beiden Enden der DBR-Laser-Wellenleiterstruktur weist eine als Bragg-Gitter ausgeführte resonante Wellenleiterstruktur 34 auf, wobei das Bragg-Gitter bevorzugt als passives Bragg-Gitter ausgeführt ist. Die Frontfacette und Bragg-Reflektor erzeugen die für den Laserbetrieb erforderliche optische Rückkopplung und bilden damit den Resonator aus. Die Gesamt-Wellenleiterstruktur ist so ausgelegt, dass entweder das TE- oder das TM-Modenspektrum genutzt wird. Der aktive Wellenleiter 62 mit der Frontfacette wird beispielsweise elektrisch gepumpt und liefert die für den Laserbetrieb erforderliche optische Verstärkung innerhalb des Resonators.

[0063] Der sich an den aktiven Wellenleiter 62 anschließende passive Wellenleiter 64 wird bei dieser Ausführungsform nicht gepumpt und leitet das optische Feld verlustarm. Dessen Länge kann so gewählt werden, dass die Gesamtlänge des DBR-Lasers den Wert hat, bei dem die emittierte optische Strahlung die optimalen Eigenschaften besitzt. Die effektive optische Länge des passiven Wellenleiters 64 kann mit Hilfe von halbleitertechnologisch in den Laserchip integrierten Heizungen („Wellenleiterheizung“) für eine Stabilisierungsregelung thermisch eingestellt werden. Damit wird eine Einstellung der Laserwellenlänge unabhängig vom Injektionsstrom des aktiven Wellenleiters 62 ermöglicht. Bevorzugt kann die optische Länge des passiven Wellenleiters 62 auch elektro-optisch eingestellt werden. Dazu kann die der passive Wellenleiter 62 elektrisch in Sperrrichtung mit einer geeigneten Spannung beaufschlagt werden.

[0064] Ein optionaler Modenfilter 66, welcher bevorzugt unmittelbar vor einem Modenkonverter 10 angeordnet ist, kann zur Unterdrückung der Propagation von Obermoden ausgebildet sein, die von links oder rechts einlaufen. Auf diese Weise wird kann sichergestellt werden, dass das von links in den Modenkonverter 10 und von rechts in den aktiven Wellenleiter 62 injizierten Felder keine Anteile von Obermoden enthalten.

[0065] Die resonante Wellenleiterstruktur 34 ist als Bragg-Reflektor ausgeführt. Die Wellenleitersektion führt die Grundmode und die erste Obermode verlustarm. Der Bragg-Reflektor ist vorzugsweise bezüglich Beugungseffizienz und Bandbreite so ausgeführt, dass der DBR-Laser 60 einen stabilen longitudinalen Einmodenbetrieb zeigt. Vorzugsweise kann der effektive Brechungsindex in der resonante Wellenleiterstruktur 34 und damit die Resonanzfrequenz der Bragg-Gitters mit Hilfe von halbleitertechnologisch in den Laserchip integrierten Heizungen („Wellenleiterheizung“) für eine Stabilisierungsregelung thermisch eingestellt werden. Bevorzugt kann der effektive Brechungsindex der resonanten Wellenleiterstruktur 34 auch elektro-optisch eingestellt werden. Dazu kann die resonante Wellenleiterstruktur 34 elektrisch in Sperrrichtung mit einer geeigneten Spannung beaufschlagt werden.

[0066] Bragg-Wellenleiter sind Wellenleiterstrukturen, in denen vorwärts- und rückwärtslaufende Felder durch Vielstrahlinterferenz miteinander gekoppelt werden. Die Vielstrahlinterferenz begründet das optische Resonanzverhalten des Bragg-Wellenleiters. Das Resonanzverhalten führt nahe der Resonanzfrequenz zu einer starken Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung, die das optische Feld beim Durchlaufen des Bragg-Wellenleiters erhält. Der Bragg-Wellenleiter ist vorzugsweise zur Führung ausschließlich der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode (insbesondere der ersten Obermode) ausgebildet, wobei in einer bevorzugten Ausführungsform nur die vertikale Grundmode geführt wird. Der Bragg-Wellenleiter reflektiert einen Anteil des Feldes zurück in Richtung des einlaufenden Feldes, der von der Länge des Bragg-Wellenleiters, der Modulationstiefe des effektiven Brechungsindex und von der Verstimmung der Frequenz des Feldes von der Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters („Bragg-Frequenz“) abhängt. Der Bragg-Wellenleiter stellt daher effektiv einen spektral schmalbandigen „Spiegel“ des Laserresonators dar.

[0067] Beim Durchlaufen des Bragg-Wellenleiters erfährt ein Feld eine Phasenverschiebung, die vom effektiven Brechungsindex, der Länge des Gitters und von der Verstimmung der Frequenz des Feldes von der Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters („Bragg-Frequenz“) abhängt. Bei Verstimmung der Frequenz eines einlaufenden Feldes über die spektrale Breite des Bragg-Reflektors entsteht dabei eine Phasenverschiebung, die größer ist, als wenn keine resonante Wellenleiterstruktur vorhanden wäre. Dies ist eine Eigenschaft aller resonanten Strukturen. Bei wellenleiterbasierten Bragg-Reflektoren hängt die Größe dieser Phasenverschiebung vom konkreten Design des Bragg-Reflektors ab, bei Ringresonatoren als Reflektor beträgt sie beispielsweise π rad (bzw. 180°).

[0068] Die Bragg-Frequenzen ν_{Bragg} der lateralen Grundmode und der und der ersten lateralen Obermode unterscheiden sich geringfügig, weil die effektiven Brechungsindizes n_{eff} für Grundmode TE₀ (TM₀) und die erste Obermode TE₁ (TM₁) sich geringfügig unterscheiden:

$$\nu_{\text{Bragg}} = c_0 / \lambda_{\text{Bragg}} \quad \lambda_{\text{Bragg}} = \Lambda / (2 \cdot n_{\text{eff}})$$

[0069] Die Gitterkonstante Λ ist nur durch die geometrische Form des Gitters bestimmt und daher für die Grundmode und die erste Obermode identisch.

[0070] Die durch das Resonanzverhalten des Bragg-Gitters bedingten Phasenverschiebungen, die die frequenzgleichen Felder von Grundmode und erster Obermode beim Durchlaufen des Bragg-Gitters erfahren, unterscheiden sich also geringfügig. Für ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel eines DBR-Lasers unterscheiden sich die effektiven Brechungsindizes für die Grundmode und die erste Obermode gemäß Tabelle 1 um $(n_{\text{TE0}} - n_{\text{TE1}}) = 3,4 \times 10^{-3}$. Die Bragg-Frequenzen der lateralen Grundmode und der ersten lateralen Obermode unterscheiden sich daher bei einer Wellenlänge von 1064 nm um

$$(\nu_{\text{BraggTE0}} - \nu_{\text{BraggTE1}}) \approx ((n_{\text{TE0}} - n_{\text{TE1}}) / n_{\text{effTE0}}) \times \nu_{\text{BraggTE0}} = 276 \text{ GHz.}$$

[0071] Bei hinreichend geringer Bandbreite des Bragg-Reflektors unterscheiden sich die Bragg-Frequenzen für die Grundmode und die erste Obermode um mehr als die Bandbreite des Bragg-Reflektors. Die Resonanzspektren des Bragg-Reflektors für die Grundmode und die erste Obermode sind dann klar getrennt. In einer bevorzugten Ausführungsform des Bragg-Wellenleiters ist diese Bedingung erfüllt. Das hier beschriebene Messkonzept erfüllt aber auch dann seine Aufgabe, wenn die Resonanzspektren nicht klar getrennt sind.

[0072] Im allgemeinen Fall hängen die Phasenverschiebungen, die die Felder der Grundmode und der ersten Obermode bei der Propagation durch den Bragg-Wellenleiter erfahren, unterschiedlich von der Laserfrequenz ab. Bei gleicher optischer Frequenz der Felder der Grundmode und der ersten Obermode entsteht daher bei Propagation der Felder durch den Wellenleiter eine Phasenverschiebung zwischen diesen Feldern, die abhängig ist von der Verstimmung der optischen Frequenz von der Bragg-Frequenz für die Grundmode.

[0073] Am Ausgang des Bragg-Wellenleiters interferieren daher die Felder der lateralen Grundmode und der ersten lateralen Obermode mit dieser zusätzlichen Phasenverschiebung. Bei einer Verstimmung der Frequenz des optischen Feldes innerhalb der Bandbreite des Bragg-Reflektors ändert sich das Interferenzbild also in einer Weise, die charakteristisch ist für die Verstimmung der Frequenz des optischen Feldes von der Bragg-Frequenz für die Grundmode.

[0074] Aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis kann ein entsprechendes Fehlersignal F für die Resonanzverstimmung abgeleitet werden. Dieses Fehlersignal F kann nach einer geeigneten Aufbereitung über eine Rückkopplungsschleife z. B. ein auf dem Laserchip in unmittelbarer Nähe des passiven Wellenleiters 64 aufgebrachtes Heizelement ansteuern. Dieses erwärmt das Bauelement lokal und ändert so den effektiven Brechungsindex für die im passiven Wellenleiter 64 geführten Wellen, so dass sich die optische Resonatorlänge und damit die Laserfrequenz ändern. Die Regelung kann so ausgelegt werden, dass der ausgeglichene Zustand eine Symmetrie bzw. eine bestimmte Asymmetrie (z. B. gleiches Signal auf zwei Photodetektoren der Detektionseinrichtung 40) besitzt und damit eine feste Verstimmung zwischen der Frequenz des Laserfeldes (Referenzfrequenz) und der Resonanzfrequenz des Bragg-Gitters eingestellt wird. Damit kann die Laserfrequenz auf die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors stabilisiert werden. Im Idealfall beeinflusst diese Regelung nicht die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors. Eine Stabilisierung kann auch durch Regelung des Injektionsstrom durch den aktiven Wellenleiter 62 erfolgen, wobei die Frequenz des Laserfeldes auf die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors stabilisiert wird. Hierbei wird aber zumeist auch die optische Leistung variiert, was für viele Anwendungen nachteilig ist. Ein weitere Möglichkeit zur Stabilisierung besteht in

der Ansteuerung einer Heizung, die in unmittelbarer Nähe des Bragg-Reflektors auf den Laserchip aufgebracht ist. Im Idealfall ändert sich hier die Resonanzfrequenz des Bragg-Reflektors, so dass so die Frequenz des Bragg-Reflektors auf die Frequenz des Laserfeldes stabilisiert werden kann.

[0075] Die beschriebene Ausführungsform eines DBR-Lasers ist technisch einfach, weil keine oder nur wenige zusätzlichen Wellenleiterstrukturen benötigt werden, um ein Fehlersignal F für die relative Stabilisierung der Frequenz des Lichtfeldes und der Resonanzfrequenz des Bragg-Wellenleiters zu erzeugen. Da die Grundmode und die Obermode durch den gleichen Wellenleiter propagieren, werden thermische Variation des Brechungsindex oder mechanische Verspannung im Gleichtakt unterdrückt. Eine solche Anordnung ist damit unempfindlicher gegen Störungen des Betriebs als herkömmliche Anordnungen zur Erzeugung eines Fehlersignals, bei denen zwei Signal an unterschiedlichen Stellen in der Anordnung erzeugt werden. Durch die Verwendung eines erfindungsgemäßen Verfahrens zur Ableitung eines Resonanz-Fehlersignals entsteht ein vorzeichenbehaftetes Fehlersignal F auch bei zeitlich konstantem Wert der Frequenz des optischen Feldes, d. h. ein vorzeichenbehaftetes Fehlersignal kann ohne kontinuierliche oder diskrete Modulation der Frequenz des optischen Feldes erreicht werden.

[0076] Dies erleichtert die Ansteuerung im Laserbetrieb. Außerdem wird die Bandbreitenbegrenzung bei der Erzeugung des Fehlersignals F vermieden, die Lösungen gemein ist, bei denen die Frequenz des optischen Feldes moduliert wird. Es lassen sich daher hohe Bandbreiten bei der Erzeugung des Fehlersignals F für die relative Frequenzstabilisierung der Frequenz des optischen Feldes und der Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur erreichen. Der Arbeitspunkt für die Stabilisierung („Fehlersignal 0“) ist dabei bevorzugt eine symmetrische Intensitätsverteilung. Im Gegensatz zu vielen alternativen Verfahren führt eine Variation der optischen Leistung am Arbeitspunkt nicht zu einer Veränderung des Fehlersignals F, weil sich die Symmetrie der Intensitätsverteilung nicht verändert. Leistungsvariationen führen daher nicht zu systematischen Fehlern im Fehlersignal.

[0077] Die zu diesem Ausführungsbeispiel eines Lasers 60 beschriebenen Zusammenhänge gelten analog auch für andere resonante Wellenleiterstrukturen und sind unabhängig von einer Verwendung innerhalb eines Lasers 60. In einer bevorzugten Ausführungsform ist die resonante Wellenleiterstruktur als Ringresonator ausgeführt (vgl. **Fig. 7**).

[0078] **Fig. 7** zeigt eine schematische Darstellung einer exemplarischen a) ersten und b) zweiten Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Sensors 70. Diese Ausführungsformen sind insbesondere für Anwendungen in der Sensorik relevant, bei denen eine in einem Wellenleiter geführte Laserstrahlung an eine resonante Wellenleiterstruktur gekoppelt wird und die Resonanzfrequenz der resonanten Struktur auf die Frequenz des Laser stabilisiert werden muss, etwa bei der hochempfindlichen Detektion von Gasen mit Hilfe von Ringresonatoren. Ein Ringresonator kann beispielsweise dem Einfluss der Umgebung ausgesetzt werden (z. B. einem Hintergrundgas, das den effektiven Brechungsindex des Ringresonators in Abhängigkeit von der Dichte des Gases verändert). Bei einer Variation der Dichte des Hintergrundgases variiert die Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur.

[0079] Bei der unter a) gezeigten ersten Ausführungsform des Sensors 70 ist die resonante Wellenleiterstruktur 34 als Ringresonator ausgebildet. Es kann sich jedoch auch um eine beliebige andere zur Durchführung eines erfindungsgemäßen Verfahrens geeignete resonante Wellenleiterstruktur 34 handeln. Beispielsweise kann diese auch als Bragg-Wellenleiter oder als auf einem Bragg-Wellenleiter basierender optischer Resonator ausgebildet sein. Alle Wellenleiterabschnitte sind vorzugsweise passiv ausgeführt. Bevorzugt führt der Ringresonator ausschließlich die transversale Grundmode verlustarm. Ebenfalls bevorzugt ist, dass der Ringresonator die Grundmode und eine oder mehrere transversale Obermoden verlustarm führen kann. Der Wellenleiter 32 ist zur Führung der Grundmode und der ersten Obermode ausgebildet. Ein Modenkonverter 10 wird zur Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung einer Grundmode und einer ersten Obermode einer in den Wellenleiter 32 eingekoppelten externen Laserstrahlung genutzt.

[0080] Vorzugsweise wird das optische Feld eines Lasers in die resonante Wellenleiterstruktur 34 eingekoppelt. Die Frequenz des optischen Feldes kann anschließend auf die Resonanzfrequenz der resonante Wellenleiterstruktur 34 abgestimmt werden. Eine Variation der Resonanzfrequenz der Wellenleiterstruktur führt dann zu einer charakteristischen Variation des Intensitätsverteilung bei der Auskopplung auf die Detektoreinrichtung 40.

[0081] Ebenfalls bevorzugt ist, dass die Frequenz des optischen Feldes des Lasers auf die Resonanzfrequenz der resonanten Wellenleiterstruktur 34 aktiv stabilisiert wird. Zur Steuerung der Laserfrequenz wird

das Signal der Detektionseinrichtung 40 als Fehlersignal F genutzt. Eine Variation der Dichte beispielsweise eines Hintergrundgases führt dann zu einer entsprechenden Variation der Resonanzfrequenz des Ringresonators und wegen der Frequenzstabilisierung zu einer entsprechenden Variation der Laserfrequenz, die mit geeigneten Verfahren nachgewiesen werden kann.

[0082] Die unter b) gezeigte zweite Ausführungsform benötigt keinen Modenkoverter. Hier wird eine Anregung der ersten Obermode durch leicht schräges Einkoppeln des optischen Feldes in den Wellenleiter 32 erreicht, der Grund- und Obermode führt. Der sonstige Aufbau der Sensoranordnung entspricht der unter a) gezeigten Ausführungsform.

Tabelle 1: Vertikale Struktur einer bevorzugten exemplarischen Wellenleiterstruktur (GaAs-basiertes System, Wellenlänge 1064 nm, numerische Simulation)

Schicht	Material	Dicke [nm]
upper cladding	$\text{Al}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$	1300
confinement	$\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	150
core	GaAs	2000
confinement	$\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$	150
lower cladding	$\text{Al}_{0,02}\text{Ga}_{0,98}\text{As}$	1800

Laterale Geometrie der Wellenleiter des Modenkoverters

Breite w_1 des Eingangswellenleiters 2,7 μm

Confinement Faktor des Eingangswellenleiters

- TE0 / TM0	84/85	[%]
- TE1 / TM1	7/4	[%]
- TE2 / TM2	3/1	[%]

Effektive Brechungsindizes der transversalen Moden des Eingangswellenleiters

- $n_{\text{TE0}} / n_{\text{TM0}}$	3,4681 / 3,4678
- $n_{\text{TE1}} / n_{\text{TM1}}$	3,4647 / 3,4643
- $n_{\text{TE2}} / n_{\text{TM2}}$	3,4642 / 3,4641

Breite w_2 des Ausgangswellenleiters 5 μm

Confinement Faktor des Ausgangswellenleiters

- TE0 / TM0	94 / 95	[%]
- TE1 / TM1	77 / 80	[%]
- TE2 / TM2	9/4	[%]
- TE3 / TM3	8/3	[%]

Effektive Brechungsindizes der transversalen Moden des Ausgangswellenleiters

- $n_{\text{TE0}} / n_{\text{TM0}}$	3,4694 / 3,4692
- $n_{\text{TE1}} / n_{\text{TM1}}$	3,4667 / 3,4664
- $n_{\text{TE2}} / n_{\text{TM2}}$	3,4646 / 3,4643
- $n_{\text{TE3}} / n_{\text{TM3}}$	3,4642 / 3,4641

kateraler Versatz δ	1	[μm]
Länge des Verbindungswellenleiters	100 (linear)	[μm]

Modentransformation Kopplungskoeffizient (Leistung) Eingang TE0 ->

- Ausgang TE0 / TM0	87,8 / 4×10^{-5}	[%]
- Ausgang TE1 / TM1	12,0 / 3×10^{-4}	[%]
- Ausgang TE2 / TM2	$< 10^{-4}$	[%]
- Ausgang TE3 / TM3	$< 10^{-4}$	[%]

Kopplungskoeffizient (Leistung) Ausgang TE0 ->

- Ausgang TE0 / TM0	87,8 / 8×10^{-5}	[%]
---------------------	---------------------------	-----

Kopplungskoeffizient (Leistung) Ausgang TE1 ->

- Ausgang TE0 / TM0	12,0 / 6×10^{-4}	[%]
---------------------	---------------------------	-----

Bezugszeichenliste

10	Modenkonverter
12	Eingangswellenleiter
14	Verbindungswellenleiter
16	Ausgangswellenleiter
30	Vorrichtung
32	Wellenleiter
34	resonante Wellenleiterstruktur
36	Mittel zur Auswertung
40	Detektionseinrichtung
42	Wellenleiter
44	Zeilen- oder Flächendetektor
44a, 44b	Einkanaldetektoren
46	Differenzverstärker
48	Wellenleitergabel
60	Laser
62	aktiver Wellenleiter
64	passiver Wellenleiter
66	Modenfilter
70	Sensor
w(z)	Breite (entlang z-Achse)
w ₁ , w ₂	erste und zweite Breite
δ	lateraler oder horizontaler Versatz (entlang x- und/oder y-Achse)
F	Fehlersignal

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ableitung eines Fehlersignals für die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur (34), umfassend die Schritte:

S1: Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung einer Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung mit einer ersten Phasenverschiebung in einem Wellenleiter (32), wobei der Wellenleiter (32) zur Führung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist;

S2: Einkopplung der kohärenten Überlagerung in die resonante Wellenleiterstruktur (34), wobei die resonante Wellenleiterstruktur (34) zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung mit einer von der Modendispersion zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode abhängigen Phasenverschiebung ausgebildet ist;

S3: Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung mit einer zweiten Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode auf eine Detektionseinrichtung (40);

S4: Messung eines Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung mittels der Detektionseinrichtung (40);

S5: Ableitung eines Fehlersignals (F) aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis bei der zweiten Phasenverschiebung unter Berücksichtigung der ersten Phasenverschiebung und einer im Resonanzfall auftretenden Restphasenverschiebung zwischen Bereitstellung und Auskopplung.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung über einen Ausgangswellenleiter (16) eines Modenkonverters (10) zur Umwandlung einer Grundmode einer Wellenleiterstruktur in eine kohärente Überlagerung aus Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode durch Einkopplung einer Referenzstrahlung in einen Eingangswellenleiter (12) des Modenkonverters (10) erfolgt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Bereitstellung einer kohärenten Überlagerung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung durch schräge Einkopplung einer Referenzstrahlung in den Wellenleiter (32) erfolgt.

4. Vorrichtung (30) zur Ableitung eines Fehlersignals für die relative Abweichung zwischen einer Referenzfrequenz einer monochromatischen Referenzstrahlung und einer Resonanzfrequenz einer für die Referenzstrahlung resonanten Wellenleiterstruktur (34) mittels eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 3, umfassend:

- einen Wellenleiter (32), wobei der Wellenleiter (32) zur Führung der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist;

- eine resonante Wellenleiterstruktur (34), wobei die Grundmode und/oder die antisymmetrische Obermode aus dem Wellenleiter (32) als kohärente Überlagerung in die resonante Wellenleiterstruktur (34) eingekoppelt werden können und die resonante Wellenleiterstruktur (34) zur resonanten Filterung der kohärenten Überlagerung bei einer von der Modendispersion abhängigen Phasenverschiebung zwischen der Grundmode und der antisymmetrischen Obermode ausgebildet ist;

- eine Detektionseinrichtung (40), wobei eine Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung auf die Detektionseinrichtung (40) erfolgt und die Detektionseinrichtung (40) zur Messung des Asymmetrie-Verhältnisses der Intensitätsverteilung der gefilterten kohärenten Überlagerung eingerichtet ist; und

- ein Mittel zur Auswertung (36), ausgebildet zur Ableitung eines Fehlersignals (F) aus dem gemessenen Asymmetrie-Verhältnis.

5. Vorrichtung nach Anspruch 4, weiterhin umfassend einen Modenkonverter (10) zur Umwandlung einer Grundmode einer Wellenleiterstruktur in eine kohärente Überlagerung aus Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode, dazu eingerichtet, eine in einen Eingangswellenleiter (12) des Modenkonverters (10) eingekoppelte Referenzstrahlung als kohärente Überlagerung einer Grundmode und einer antisymmetrischen Obermode der Referenzstrahlung in den Wellenleiter (32) einzukoppeln.

6. Vorrichtung nach Anspruch 4 oder 5, wobei die Detektionseinrichtung (40) einen Zeilen- oder Flächendetektor (42) umfasst.

7. Vorrichtung nach Anspruch 4 oder 5, wobei die Detektionseinrichtung (40) mindestens zwei Einkanal-detektoren (44a, 44b) umfasst, wobei die Auskopplung der gefilterten kohärenten Überlagerung auf die Einkanal-detektoren (44a, 44b) unmittelbar oder über eine evaneszent angekoppelte monomodige Wellenleitergabel (48) erfolgt.

8. Laser (60), **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Frequenzstabilisierung der Emission des Lasers (60) mittels des abgeleiteten Fehlersignals (F) einer Vorrichtung (30) nach einem der Ansprüche 4 bis 7 erfolgt.

9. Sensor (70), umfassend eine Vorrichtung (30) nach einem der Ansprüche 4 bis 7, wobei die Vorrichtung (30) dazu ausgebildet ist, eine Veränderung der Resonanzeigenschaften der resonanten Wellenleiterstruktur (34) aufgrund äußerer Einflüsse über das abgeleitete Fehlersignal (F) zu erfassen.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

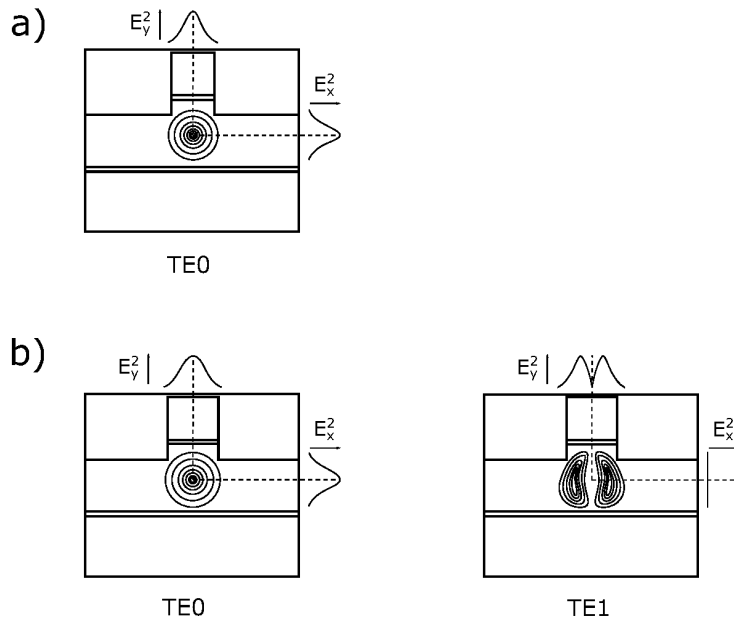


FIG. 1

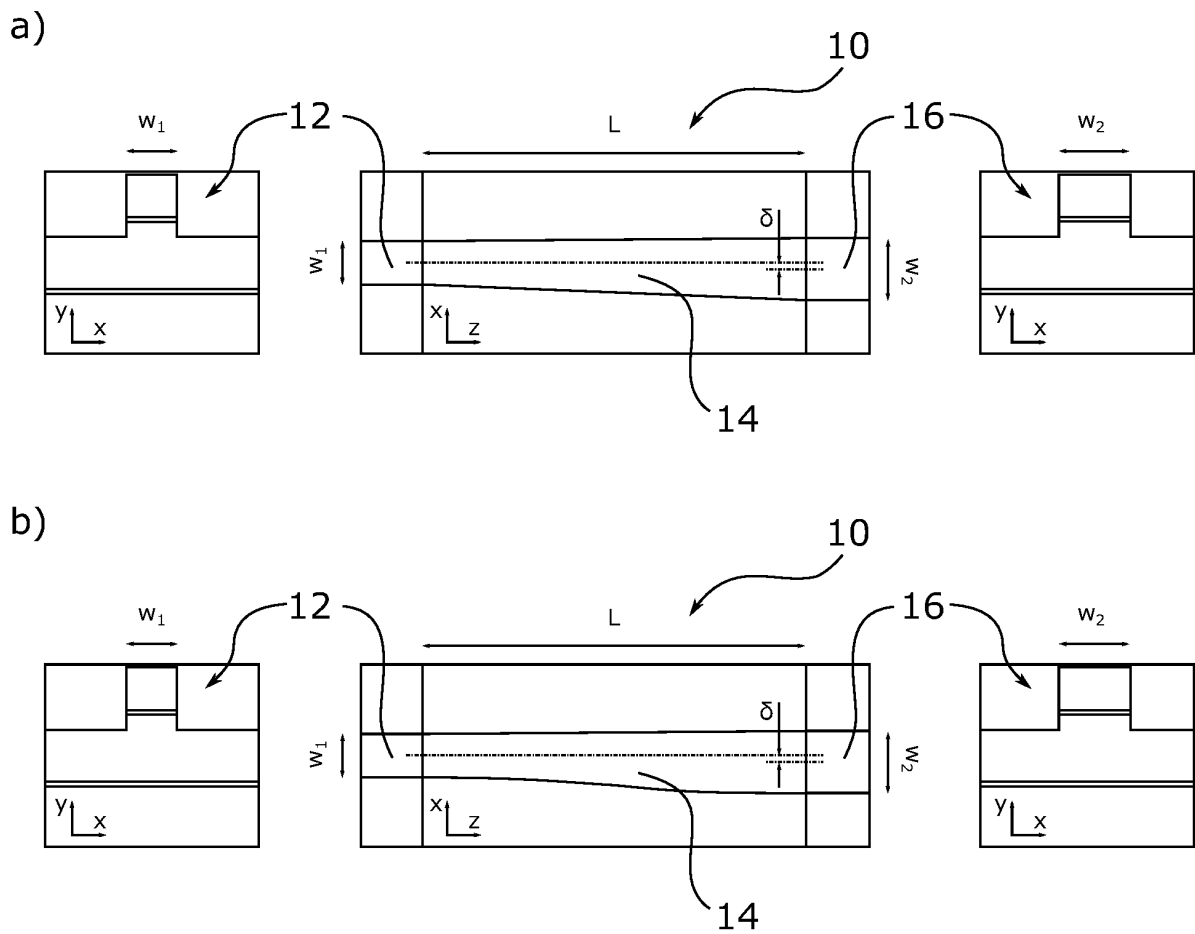


FIG. 2

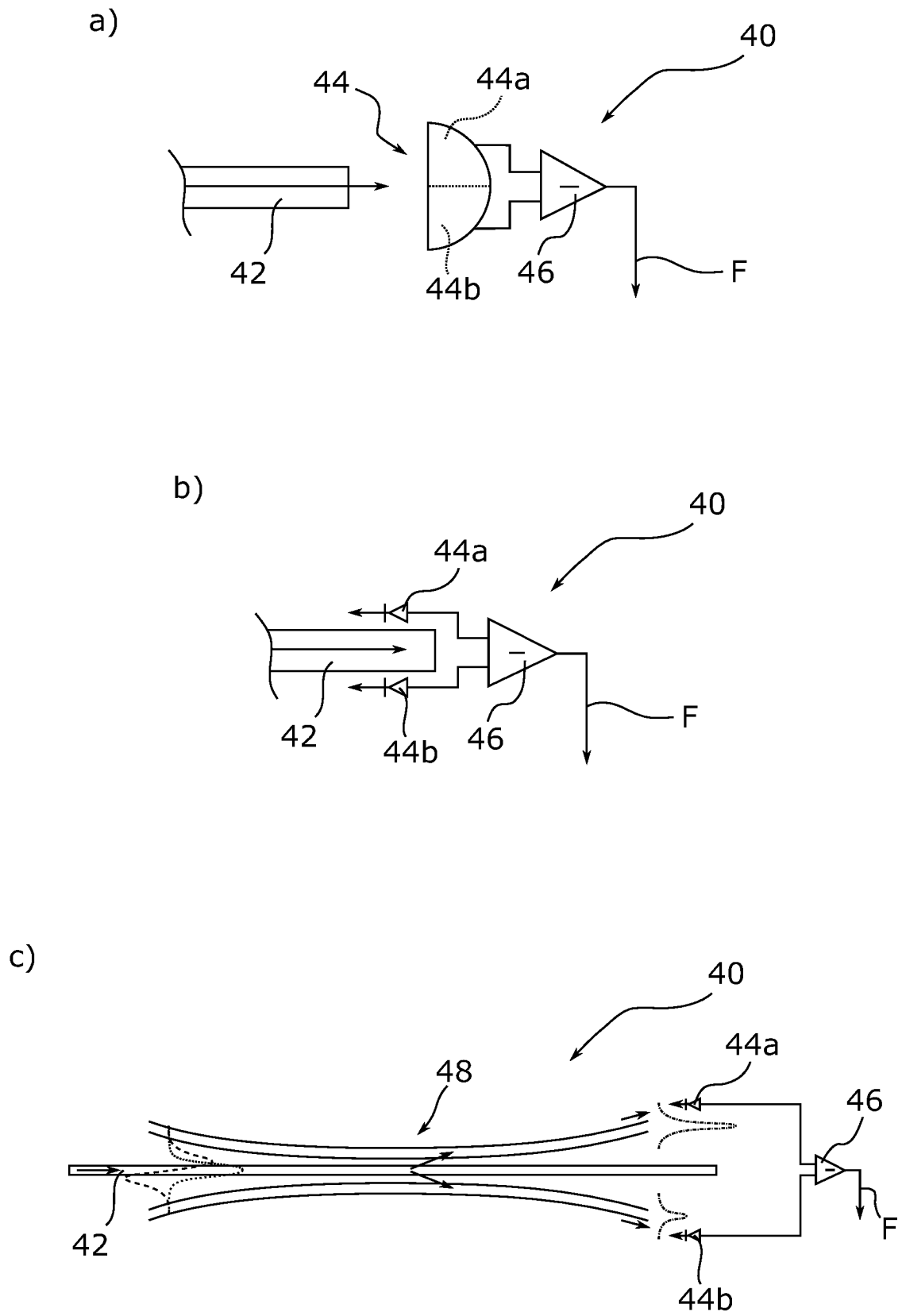


FIG. 3

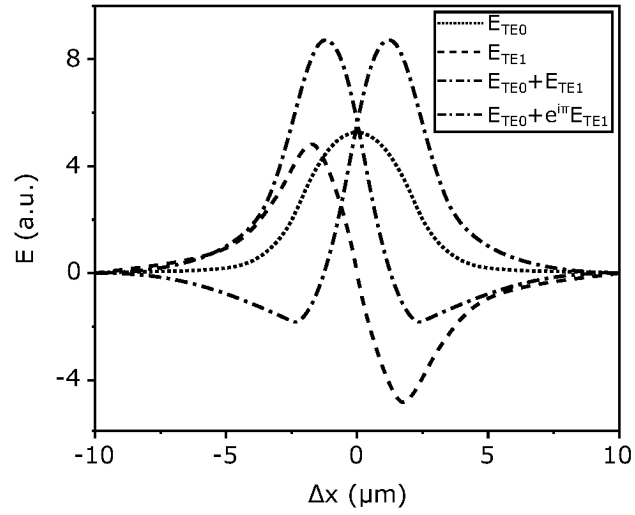


FIG. 4

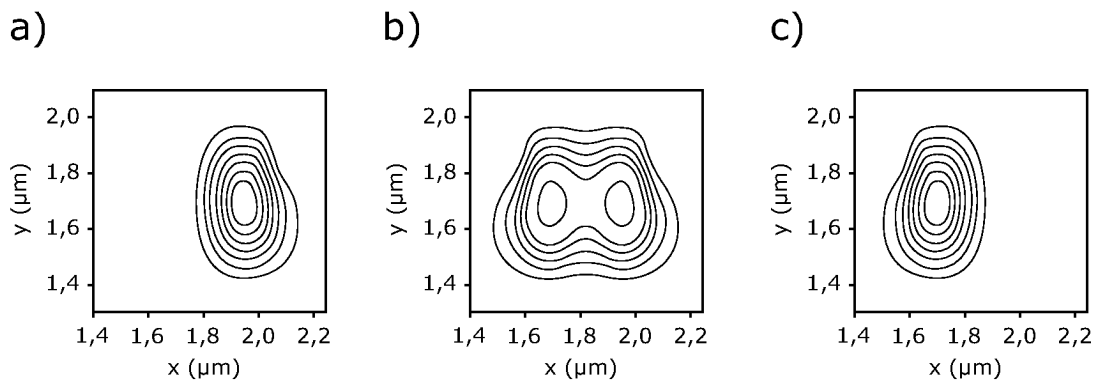


FIG. 5

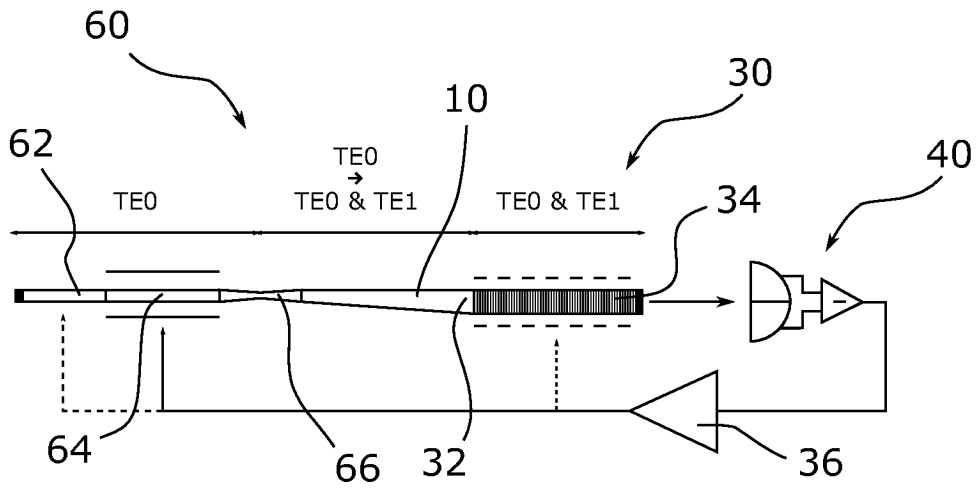


FIG. 6

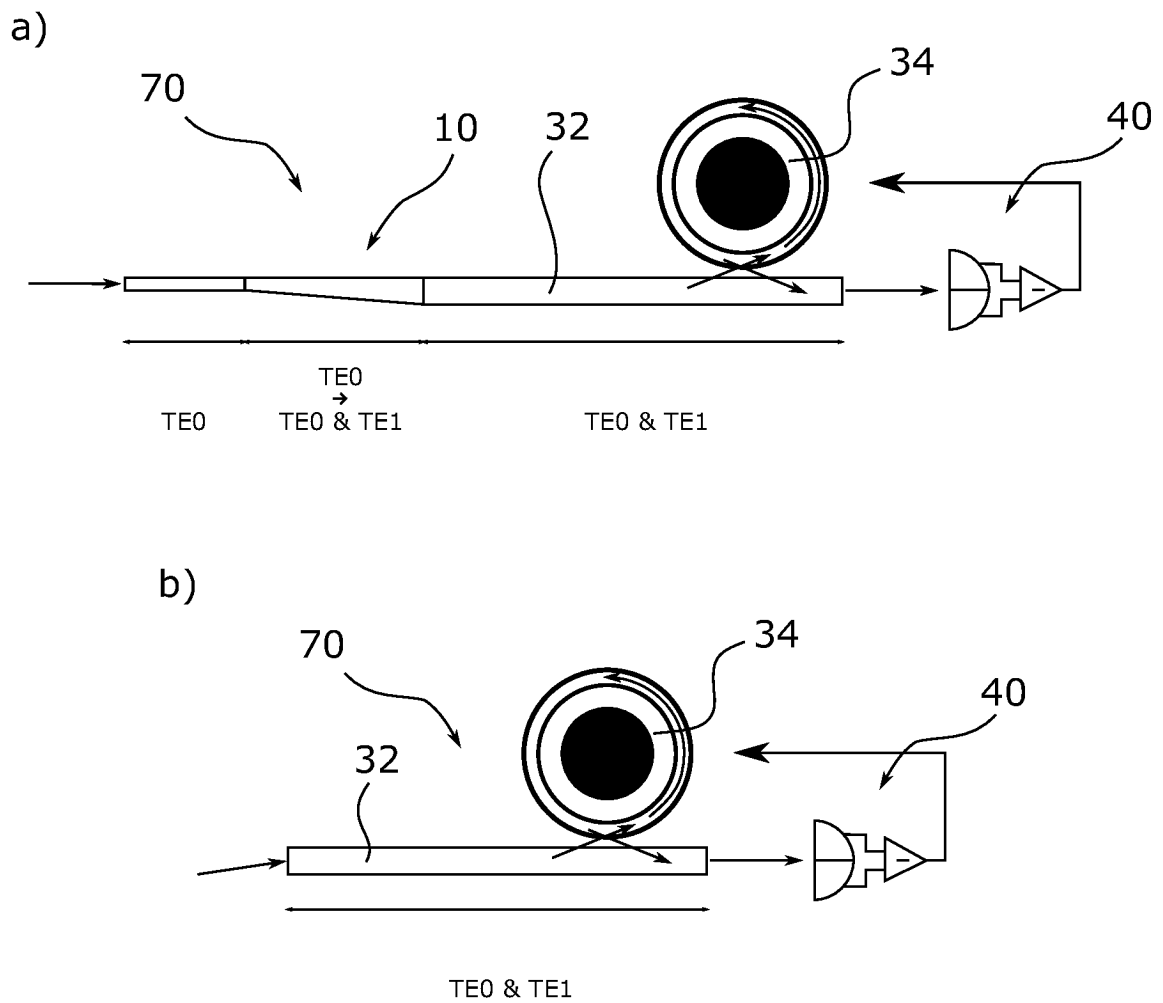


FIG. 7